



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea in Fisica

Tesi di Laurea

Storia del principio di conservazione dell'energia

Relatore

Prof. Giulio Peruzzi

Laureando

Steven Southworth

Anno Accademico 2023/2024

Indice

- i. Il Principio di Conservazione dell'Energia
- ii. Il termine Energia
- iii. Calore ed Energia
- iv. Maggiori Contributori
- v. Hermann von Helmholtz
- vi. Conclusioni
- vii. Bibliografia

Storia del Principio di Conservazione dell'Energia

Nel discorso per il gruppo di filosofia della scienza della British Society for the History of Science nel 1952¹, Sir Karl Popper richiamò ciò che Wittgenstein disse nella chiusa del suo *Tractatus logico-philosophicus*: “Quando non si può parlare di una cosa, bisogna astenersi dal parlarne”, ma aggiunse anche la celebre risposta di Schrödinger: “Ma solo di essa val la pena di parlare”.

Su queste note avrà inizio la mia tesi, sebbene comprenda la difficoltà di dare una trattazione completa ed esaustiva, e sentendomi un nano sulle spalle di giganti della storia della fisica che hanno già trattato questo argomento con maggiore competenza e in maniera assai più completa di quanto io possa fare nelle poche pagine di questa trattazione. Ho quindi affrontato questo tema avvalendomi del testo ben fatto di Yehuda Elkana, *La scoperta della conservazione dell'energia*, grazie al quale ho potuto effettuare un breve riassunto della storia del principio di conservazione dell'Energia, tema che egli affronta in maniera assai più esaustiva di quanto potrò fare io e da cui ho tratto alcuni aspetti salienti raggruppandoli in modo da fornire un filo conduttore nelle seguenti pagine di questa tesi.

i. Il Principio di Conservazione dell'Energia

Prima di iniziare l'exkursus storico diamo un breve riassunto dell'attuale concetto di Energia e del suo principio di Conservazione come lo conosciamo al momento attuale.

Per fare ciò utilizziamo le parole del celebre fisico Richard Feynman che a tale proposito si espresse in questi termini:

“Esiste una proprietà, o se preferite una *legge*, che governa tutti i fenomeni naturali conosciuti fino ad oggi. Non si conosce eccezione a questa legge - essa è esatta nel limite delle nostre conoscenze. La legge è chiamata *conservazione dell'energia*. Essa stabilisce che vi è una certa quantità, che chiamiamo energia, che non cambia nei molteplici mutamenti subiti dalla natura. Il concetto è astratto, poiché **si tratta di un principio matematico**; esso afferma che esiste una quantità numerica che non cambia qualsiasi cosa accada. Non è la descrizione di un meccanismo o di un fenomeno

¹ Ristampato in *Conjectures and Refutations* col titolo *The Nature of Philosophical Problems and their Roots in Science*, London 1963, p. 66. Citazione ripresa dal libro di Elkana (vedasi bibliografia).

concreto, è soltanto il fatto singolare di poter calcolare un numero, e dopo aver osservato i mutamenti capricciosi della natura, ricalcolarlo ottenendo sempre lo stesso risultato. (Qualcosa di simile al movimento di un alfiere sui quadrati rossi della scacchiera, qualunque sia il numero delle mosse – ignoriamo i dettagli – esso si trova sempre sul rosso. È una legge di questo tipo).”² E prosegue dicendo:

“Primo, quando ci mettiamo a calcolare l’energia, talvolta una parte di essa abbandona il sistema e talvolta, invece, vi si introduce. Per verificare la conservazione dell’energia dobbiamo fare attenzione a non averne né tolta né introdotta. Secondo, l’energia ha un gran numero *di forme diverse* e vi è una formula per ciascuna di esse. Abbiamo: l’energia gravitazionale, l’energia cinetica, l’energia termica, l’energia elastica, l’energia elettrica, l’energia chimica, l’energia radiante, l’energia nucleare e l’energia di massa. Se sommiamo le formule per ciascuno di questi contributi, vedremo che il totale non cambia eccetto che per l’energia che entra e che esce.

È importante tener presente che nella fisica odierna, noi non abbiamo cognizione di ciò che l’energia è. Non abbiamo un modello che esprima l’energia come somma di termini definiti. Non è così. Tuttavia vi sono formule per calcolare alcune quantità numeriche e se le sommiamo tutte otterremo “28” - sempre lo stesso numero. Si tratta di un’astrazione in quanto non ci insegna il meccanismo o i *motivi* delle varie formule”.³

(Il numero “28” menzionato da Feynman è riferito ad un esempio che usa per cercare di aiutare a visualizzare il concetto di conservazione dell’Energia)

Notare che nella citazione ho messo in grassetto l’espressione **si tratta di un principio matematico**; su questo punto ritorneremo più avanti nella nostra trattazione, che sarà anche un tassello chiave nelle inferenze a proposito di chi si possa reputare lo scopritore di tale principio.

Sta di fatto che, stando alle nostre conoscenze attuali, nessun nuovo esperimento ha dimostrato la non validità di questo Principio di Conservazione dell’Energia. Ciò detto, è opportuno far presente che non c’è neppure una prova “a priori” di suddetto principio; quindi, anche se non è ancora stato scoperto un esperimento che violi tale principio, non si può nemmeno escludere l’ipotesi che esso possa venire violato o magari ristretto ad un campo di validità minore in seguito.

Da notare, però, che la fiducia di alcuni scienziati in tale principio, nonostante l’apparente violazione ad una prima analisi di alcuni fenomeni, ha portato la scienza

² Richard P. Feynman, Robert B. Leighton, Matthew Sands, “*La fisica di Feynman*”, vol. 1, cap. 4, sezione 4-1, Zanichelli, p. 4-1.

³ Cfr. *ivi*, pp. 4-2, 4-3.

alla scoperta di nuove particelle⁴, a sviluppi concettuali importanti e alla generalizzazione di tale principio.

Del resto, nonostante lo scienziato cerchi di evitarlo per quanto possibile, è necessario o per lo meno utile in certi casi, come vedremo anche in questa trattazione, la forte credenza in un principio pur senza una dimostrazione a priori concreta. Questa convinzione preconcepita dello scienziato, riguardo ad alcune leggi o principi, lo può portare a fare previsioni o a focalizzarsi su un certo ambito sino a portarlo, infine, alla scoperta o all'ampliamento di alcune teorie.

ii. Il termine Energia

Il termine “Energia” deriva dal greco ἐνέργεια (*enérghēia*), che viene da ἐνεργής (*energhès*) che significa, tra le varie sfumature di significato, “che ha forza di fare”⁵. Questo termine *enérghēia* (atto) fu usato da Aristotele in contrapposizione con l'altro termine complementare di *dynamis* (potenza). Quindi ad esempio, un'immagine visiva di ciò può essere il seme che diventa un albero.

Questo termine viene ripreso anche da Leibniz (1646-1716), anche se non per parlare della sua idea di forza, “*vis viva*”, ma per ambiti diversi e, comunque, continuando a tenere a mente il significato aristotelico della parola.

Anche nelle altre lingue l'uso del termine energia (nel senso di “energy” in inglese, “energie” in tedesco, “énergie” in francese) aveva ancora un'accezione prettamente letteraria fino almeno ai primi anni dell'Ottocento. Possiamo vedere questo aspetto anche in alcuni scritti letterari del celebre chimico inglese Humphry Davy (1778-1829), nonostante egli utilizzi questo termine anche in alcuni ambiti scientifici, anche se con un significato vago (vedremo quest'ultimo aspetto, cioè l'uso del termine energia in ambito scientifico da parte di Davy, più avanti). La persona, comunque, a cui si attribuisce il primato di aver utilizzato il termine di energia con l'accezione moderna del termine, fu Thomas Young (1773-1829) nelle *Lectures on Natural Philosophy* (1807):

⁴ Il neutrino, infatti, fu postulato da Pauli nel 1930 come terza particella emessa oltre all'elettrone e al nucleo nel decadimento beta nel tentativo di spiegare perché si misurasse uno spettro continuo dell'elettrone. Mentre Bohr, ad esempio, aveva ipotizzato che questo fosse un caso di violazione della conservazione dell'energia.

⁵ Tratto da Wikipedia alla voce “Energia” (link messo nella bibliografia) e confrontato comunque con altri siti e dizionari.

“Il vocabolo energia può essere applicato in modo molto appropriato al prodotto della massa o peso del corpo per il quadrato del numero che ne esprime la velocità... Questo prodotto è stato denominato forza viva o ascendente... Alcuni lo hanno considerato la vera misura della quantità di moto; ma anche se questa tesi è stata rifiutata universalmente, la forza stimata in questo modo merita però una denominazione distinta.”⁶

Nonostante questa affermazione, siamo ben lungi dal poter dire che Young avesse un’idea estesa del concetto di energia come la intendiamo noi modernamente; infatti, ciò che egli descrive viene chiamata oggi “energia cinetica”, che è solo un tipo specifico tra tutti i possibili tipi di energia e, perciò, non comprende il termine nel suo ambito più generale. Inoltre, da altre sue affermazioni, si può notare che non aveva in mente idee di conservazione riferendosi all’energia e, quindi, non si può propriamente dire che ne avesse compreso il concetto e la portata nella sua generalità. Infatti, usando le parole di Planck: “Il concetto di energia acquista il suo significato per la fisica solo attraverso il principio [della sua conservazione].”⁷

Leibniz, invece, aveva l’idea di un principio fondamentale, che è la conservazione della forza. Ciò che egli intende però come forza, non ha nulla a che vedere con il concetto che Newton ne ha, ossia di vettore-forza. D’altro canto, però, non ha neppure a che fare con quello di energia come potremmo essere tentati di pensare. Questa forza aveva, secondo lui, un effetto che a seconda dei casi andava come mv^2 , mv o anche semplicemente come un’entità metafisica. Non c’è da stupirsi di imbattersi in un così ampio e vario spettro; infatti, fisico e spirituale per Leibniz si fondono. Anche se ciò può sembrare molto confuso, dobbiamo renderci conto che nella scienza spesso, agli albori di una scoperta, le definizioni e i principi a cui poi diventiamo abituati e ai quali attribuiamo una chiara e precisa definizione, siano inizialmente formulati in modo confuso e vago, proprio perché ancora stanno subendo il processo di venire formulati e chiariti.

Il concetto di forza ed energia, come oggi li conosciamo, erano infatti intrecciati e sovrapposti, come un’emulsione o, per usare un’immagine visiva più espressiva per il lettore, come una maionese: un sistema composto da due liquidi immiscibili (acqua e olio), che grazie ad un tensioattivo (la lecitina, contenuta all’interno del tuorlo d’uovo) e ad un’agitazione intensa si omogeneizza. In modo analogo, nel tempo, si era creata un’emulsione tra forza ed energia, che iniziò il suo processo di coalescenza grazie al

⁶ Thomas Young, *Lectures on Natural Philosophy*, 2 voll., London 1807. Citazione ripresa dal libro di Elkana (vedasi bibliografia).

⁷ Planck, *Das Prinzip der Erhaltung der Energie*. Citazione ripresa dal libro di Elkana (vedasi bibliografia).

saggio di Hermann von Helmholtz del 1847 *Über die Erhaltung der Kraft* (*Sulla conservazione della forza*). Infatti, prendendo i testi di vari autori precedenti a quest'opera e anche dello stesso Helmholtz, il lettore noterà che nel leggere quei testi, con le nostre attuali definizioni di forza ed energia, ne uscirebbe un quadro molto confuso; e se pure adottasse l'arguzia di leggere tutte le opere di un unico autore sperando così di ottenere una terminologia coerente, si accorgerebbe che il termine forza viene usato a volte per descrivere la nostra forza e a volte per descrivere quella che potremmo chiamare energia.

Sta di fatto, però, che per tutti quei filosofi e filosofi naturali che ricercavano e credevano fermamente in leggi o principi generali naturali, sia che la si chiamasse forza o energia, ritenevano che questa proprietà comunque ci fosse, e che si dovesse conservare, anche se tale proprietà era ancora in uno stato vago, sfocato e fluido.

L'energia, come concetto fisico conosciuto oggi, è intrinsecamente connessa con la sua conservazione (come abbiamo già constatato nella precedente citazione di Planck) e ha dato contributi importanti nella fisica classica acquisendo, poi, nuove caratteristiche con l'avvento della teoria della relatività e della meccanica quantistica.

Quindi, quella idea e convinzione, radicata in Helmholtz, nel concetto ancora vago di conservazione delle forze era ciò a cui egli dedicò le sue ricerche, fino a farlo arrivare alla generalizzazione della legge di conservazione della "forza" ("Kraft"), per giungere, infine, alla formazione del concetto di energia; possiamo infatti notare che nei suoi scritti dal 1880 in poi, egli inizia a usare termini come "Constanz der Energie" (cioè costanza dell'energia), con l'accezione ben definita e "moderna" del termine.

In questa trattazione, anche se può sembrare sorprendente, non considereremo la presa di coscienza dell'impossibilità del moto perpetuo, che nel 1775 spinse l'Académie Royale des Sciences di Parigi a decidere di non prendere più in esame alcuna macchina per provare il moto perpetuo; facciamo questo perché, sebbene il principio di conservazione implichi l'impossibilità del moto perpetuo, essa è una condizione necessaria ma non sufficiente (più avanti riprenderemo l'argomento e forse risulterà più chiaro).

Continuando, comunque, nella trattazione ed evoluzione storica del principio di conservazione dell'energia, ricordiamo che nella prima metà del XVIII secolo i matematici si occuparono dello sviluppo della meccanica, grazie al lavoro di personaggi come Eulero (Leonhard Euler 1707-1783), d'Alembert (Jean-Baptiste Le Rond d'Alembert 1717-1783) e Lagrange (Joseph-Louis Lagrange 1736-1813).

Eulero, nella sua opera intitolata *Mechanica* del 1736, adempì l'importante compito di far avanzare in linguaggio matematico il lavoro di Newton, cercando di chiarificare tutti i concetti newtoniani di forza presenti.

D'Alembert, invece, nel suo *Traité de dynamique* del 1743, e con aggiunte nell'edizione del 1758, si focalizza su tre principi, che sono: forza di inerzia, principio del moto composto e principio dell'equilibrio; i suoi risultati espressi con terminologia dei nostri giorni prendono la forma della seguente equazione

$$\mathbf{F} + \mathbf{I} = 0$$

che è ottenuta partendo dalla legge del moto di Newton, che Eulero formula come $m\mathbf{a} = \mathbf{F}$ e, dopo aver spostato tutto a secondo membro dell'equazione, esprime nella forma seguente $\mathbf{F} - m\mathbf{a} = 0$, che diventa la formula sopra scritta con $\mathbf{I} = -m\mathbf{a}$, da Eulero chiamata "forza d'inerzia".

Ciò che si ottiene, da questa riformulazione, è un nuovo principio concettuale: la forza d'inerzia può essere chiaramente vista come una forza⁸ che si somma vettorialmente al totale di tutte le restanti forze agenti su tale corpo.

Da qui prese vita la trattazione scalare che fu successivamente sviluppata da Lagrange arrivando al coronamento della meccanica razionale. Il sistema di equazioni, scritto con linguaggio moderno, a cui Lagrange giunse è:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial \dot{q}} L \right) - \frac{\partial}{\partial q} L = 0$$

con le q che rappresentano le, cosiddette, coordinate generalizzate, L è una funzione lagrangiana definita come $L = T - V$, con T che è l'energia cinetica, usando il nostro vocabolario moderno, e V l'energia potenziale che, da Lagrange, veniva invece chiamata con il nome di funzione potenziale. Per la nostra trattazione ciò che è di rilievo è il fatto che queste equazioni usano una sola funzione scalare L , la quale determina tutta la dinamica del problema in oggetto. In effetti, queste equazioni altro non sono che un principio differenziale dell'energia, per adoperare termini più attuali.

⁸ Newton non prese mai una posizione chiara su come doveva essere considerata la "forza d'inerzia", se come una qualsiasi altra forza o se come qualcosa di differente. Comunque, la formulazione successiva di Eulero, $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$, fu già un gran sviluppo e chiarificazione matematica della "vis inertiae" di Newton che poi, a sua volta, venne ulteriormente chiarita con D'Alembert.

“Meglio di quanto non avesse fatto d’Alembert, Lagrange stabilì che la conservazione di forze vive è una conseguenza delle equazioni di dinamica, purché i vincoli siano esenti da attrito e indipendenti dal tempo.”⁹

Ora questo potrebbe già sembrare, ad un giudizio affrettato della questione, la conclusione della nostra trattazione sul principio di conservazione dell’energia ma, in realtà, qui ci stiamo riferendo alla sola energia meccanica (che è solo un caso particolare del ben più generale e ampio concetto di energia). Perciò, la domanda sorge spontanea: la conservazione valeva solo per lo specifico e ristretto caso di assenza d’attrito e vincoli indipendenti dal tempo? e cosa dire per tutti gli altri casi? L’energia si conservava lo stesso o veniva dispersa e distrutta a seconda dei casi? Domande tutt’altro che scontate per scienziati e filosofi che non erano ancora in possesso delle conoscenze attuali. Perciò, ai loro occhi, questa legge di conservazione si riferiva al concetto, a loro già noto, di “forza viva” e “funzione potenziale” ristretta, però, al caso particolare appena menzionato (assenza d’attrito e vincoli indipendenti dal tempo).

Comunque, nonostante la sua ristretta applicazione, questo risultato acquisì una grande importanza tra i matematici, perché dette loro un’opportunità pratica di ampliare il campo di problemi affrontabili.

Arriviamo così a Hermann von Helmholtz, il quale (secondo quanto egli stesso ammise) lesse in giovane età oltre che testi filosofici e fisici anche i testi di Newton, Eulero, d’Alembert e Lagrange ottenendo così una buona conoscenza fisica e matematica. Egli era pertanto consapevole delle due linee di pensiero della meccanica presenti agli inizi del XIX secolo: quella newtoniana-vettoriale da una parte, il cui focus erano le forze e i cui elementi fondamentali erano, perciò, spazio, tempo, massa e forza; e dall’altra quella meccanica analitica, formulata da Leibniz, Eulero e Lagrange, e il cui focus erano la “forza viva” e la “funzione potenziale”, viste come scalari, e quindi adottando come elementi fondamentali lo spazio, il tempo, la massa e l’energia.

Prima però di esaminare più a fondo il lavoro di Helmholtz facciamo una digressione sul calore e l’energia.

⁹ Dugas, *History of Mechanics*, p. 343. Citazione ripresa dal libro di Elkana (vedasi bibliografia).

iii. Calore ed Energia

Per quanto riguarda il calore, prenderemo in considerazione, nello specifico, la teoria del calorico proposta da Lavoisier (1743-1794), per il fatto che - grazie all'ottima capacità di spiegazione dei problemi affrontati all'epoca su tale argomento - fu per certi versi un ostacolo all'unione tra la teoria fisica atomica e la teoria chimica, costituendo un problema per la scoperta e sviluppo del concetto di conservazione generale dell'energia, in quanto questa unione era una condizione essenziale per collegare il mondo dell'"energia" meccanica a quello del calore.

"I fisici sono divisi sulla natura del calore. Molti fra loro lo considerano un fluido diffuso nell'intera natura e da cui i corpi sono più o meno penetrati, in ragione della loro temperatura e della loro disposizione particolare a conservarlo... Altri fisici pensano che il calore non sia altro che il risultato dei movimenti insensibili delle molecole della materia... Secondo i fisici di cui stiamo parlando, è questo movimento interno a costituire il calore."¹⁰

Fu Lavoisier a coniare il termine "calorico", utilizzato per identificare la materia del calore, che consisteva di un fluido composto di particelle che si respingevano tra loro ed erano attratte dalla materia ordinaria. Questo modello spiegava: l'espansione dovuta al riscaldamento, come pure la complementare contrazione dovuta al raffreddamento; la non costanza delle capacità termiche specifiche e la loro dipendenza dalla temperatura (quest'ultimo si adattava in modo soddisfacente alla teoria del calorico, visto che la densità della nube di calorico avvolgente l'atomo era dipendente dalla temperatura).

Nonostante spiegasse gran parte dei fenomeni noti a quel tempo, essa non dava ragione, per esempio, né del calore generato per attrito né delle teorie dell'irraggiamento, le quali però presero piede più avanti nel corso della storia, lasciando così alla teoria del calorico il tempo e lo spazio necessari per il suo consolidarsi nell'opinione scientifica.

Esamineremo ora come, proprio grazie agli esperimenti condotti sull'attrito, il conte Rumford (Sir Benjamin Thompson, 1753-1814) e Sir Humphry Davy (1778-1829) arrivarono a confutare la teoria del calorico in favore della tesi che il calore è in realtà movimento.

¹⁰ A. Lavoisier e P.-S. Laplace, *Mémoire sur la chaleur* (1780), Gauthier-Villars, Paris 1920. Citazione ripresa dal libro di Elkana (vedasi bibliografia).

In effetti, trovando particolarmente piacevole l'esperimento e la spiegazione di Rumford, che contiene delle espressioni degne di nota anche per la tesi da me affrontata, procederò a presentare alcune delle affermazioni fatte da Rumford alla Royal Society nel 1798 sul tema *An Experimental Inquiry concerning the Source of the Heat which is Excited by Friction*:

“Recentemente, essendo impegnato nel controllo dell'alesatura dei cannoni nelle officine dell'arsenale militare a Monaco di Baviera, fui colpito dal grado davvero considerevole di calore che un cannone di ottone acquista in breve tempo durante l'alesatura e dal calore ancora più intenso (molto maggiore di quello dell'acqua bollente, come accertai per via di esperimento) dei frammenti metallici che l'alesatura ne stacca. Quanto più meditai su questi fenomeni, tanto più essi mi sembravano curiosi e interessanti. Mi convinsi che un'investigazione approfondita avrebbe permesso di gettare maggior luce sulla natura recondita del calore e di formare una qualche ragionevole congettura sull'esistenza o inesistenza di un *fluido igneo*, un argomento su cui le opinioni dei filosofi sono state in tutti i tempi molto divise.”¹¹

“Se fosse stato così [se erano cioè i trucioli a fornire il calore] allora, secondo le moderne dottrine del calore latente e del calorico, la *capacità di calore* delle parti del metallo così ridotte in trucioli dovrebbe non solo essere mutata, ma il cambiamento subito da esse dovrebbe essere abbastanza grande da render ragione di *tutto* il calore prodotto.”¹²

“Trovando tante ragioni per concludere che il calore generato, o eccitato, come preferirei dire, in questi esperimenti, non fu fornito *a spese del calore latente o calorico combinato* del metallo...”¹³

“E, ragionando su quest'argomento, non dobbiamo dimenticare di considerare la circostanza più notevole, che la sorgente del calore generato per attrito, in questi esperimenti, appariva manifestamente *inesauribile*.”

Non è il caso di insistere sul fatto che una cosa che un corpo *isolato*, o un sistema di corpi, può continuare a fornire *senza limitazione* non può essere una *sostanza materiale*; e mi pare estremamente difficile, se non del tutto impossibile, formarmi un'idea distinta di una cosa che possa essere eccitata e comunicata nel modo in cui il

¹¹ S.C. Brown (ed.), *Collected Works of Count Rumford*, Harvard 1968, vol. I. Citazione ripresa dal libro di Elkana (vedasi bibliografia).

¹² Ibid.

¹³ Ibid.

calore fu eccitato e comunicato in questi esperimenti, a meno che non si tratti di un MOTO.”¹⁴

(Si noti che i corsivi e la scritta a lettere capitali sono dello stesso Rumford)

Da queste frasi emerge chiaramente che Rumford mette in discussione la teoria del calorico facendo notare che, se si provasse a spiegare con essa la produzione di calore per attrito dovuto all'alesatura dei cannoni, si dovrebbe ipotizzare che il calore provenga dai trucioli prodotti dall'alesatura i quali sprigionerebbero il loro “calorico combinato”, cioè la propria capacità termica, riducendo perciò la capacità di conservarlo in forma combinata. Rumford, però, testò la veridicità di questa ipotesi scoprendo che la capacità termica dei trucioli in realtà non era variata.

Inoltre Rumford, per provare che il calore è moto e non calorico, utilizza il fatto che dagli esperimenti sembrerebbe che la sorgente del calore generato sia inesauribile (Rumford stesso evidenzia questo termine mettendolo in corsivo), il che è una dimostrazione palese - a detta dello stesso Rumford - che il calore non può essere prodotto da una sostanza come il calorico, perché ciò implicherebbe che da una sostanza materiale si possa fornire calore senza limiti, ma una sostanza materiale, come sappiamo, non può essere inesauribile. Questa affermazione è molto interessante in quanto mostra che Rumford non pensava minimamente assurda la possibilità di produzione inesauribile di calore per attrito, il che mostra chiaramente che l'idea di un principio di conservazione, così radicato e addirittura scontato nella mente di uno scienziato moderno, non era un concetto per nulla ovvio e scontato per tutti gli scienziati dell'epoca.

Quindi, nonostante già nel 1775 l'Académie Royale des Sciences di Parigi avesse dichiarato che non avrebbe più preso in esame alcuna macchina per provare il moto perpetuo e che, nonostante ci potesse essere la convinzione dell'impossibilità di generare il moto perpetuo, ciò non costituiva una condizione sufficiente per poter allora credere nel principio di conservazione. Sono significative, a questo proposito, le parole di Planck:

“Passò ancora molto tempo prima che si pervenisse alla successiva nozione, essenziale in quest'ambito, che quel principio può anche essere *rovesciato*, che non esiste dunque alcuna apparecchiatura per mezzo della quale sia possibile consumare continuamente

¹⁴ Ibid.

lavoro o forza viva senza che intervenga un diverso mutamento considerabile come una compensazione.”¹⁵

Anche Humphry Davy, agli inizi, era a favore della tesi che il calore fosse causato dal moto e non dal calorico, come egli stesso afferma di aver dimostrato attraverso il celebre esperimento dello sfregamento del ghiaccio nel proprio saggio *An Essay on Heat, Light and the Combinations of Light* del 1799. Non riprodurrò qui il brano del suo esperimento, come fatto per Rumford, per il semplice fatto che questo esperimento pare del tutto inattendibile e di difficile esecuzione anche per un fisico esperto, quindi, in particolare anche per Davy, se teniamo in considerazione le poche conoscenze scientifiche che possedeva a quel tempo. Inoltre, va menzionato che con il passare del tempo Davy acquisì una posizione meno sbilanciata, più tiepida se vogliamo, o più equilibrata sulla questione di quale tra le due teorie sul calore fosse quella corretta.

Prima di passare oltre notiamo tuttavia l'uso che Davy fece della parola energia. Egli la usò molto nel contesto letterario, mentre nei suoi testi scientifici egli la usò con un'accezione vaga ed indefinita, come si vede nei due suoi brani seguenti:

“Se consideriamo le energie elettriche dei corpi, l'ossigeno e tutti i corpi che contengono una proporzione di ossigeno considerevole ci appaiono *negativi*, mentre l'idrogeno, i metalli e tutti i corpi combustibili ci appaiono *positivi*.”¹⁶

“Per poter comprendere la persistenza o i mutamenti delle forme dei corpi, le serie di eventi che si verificano nella storia della natura e nelle operazioni dell'arte, è necessario, come ho menzionato nella conferenza introduttiva, considerare i poteri attivi appartenenti alla materia e le leggi delle loro operazioni.

Per poteri attivi intendo quei poteri che non possono essere separati dai corpi cui ineriscono e che producono i moti delle loro particelle, come l'energia espansiva del potere di repulsione che produce calore, e l'attrazione nelle sue diverse varietà: come attrazione gravitazionale, chimica o elettrica.”¹⁷

Qui vediamo che Davy usa il termine “energia”, oltre che nel campo letterario, anche in quello scientifico con un significato però mutevole e fluido. Infatti, mentre nella prima citazione lo usa come analogo di “tipo”, nella seconda lo adopera con una connotazione più indefinita.

¹⁵ M. Planck, *Das Prinzip der Erhaltung der Energie*, Berlin 1913. Citazione ripresa dal libro di Elkana (vedasi bibliografia).

¹⁶ Davy, *Collected Works*, vol. I, p. 155. Citazione ripresa dal libro di Elkana (vedasi bibliografia).

¹⁷ Cfr. *ivi*, vol. VIII, p. 337. Citazione ripresa dal libro di Elkana (vedasi bibliografia).

E a proposito di questa fluidità, nell'uso della parola "energia", consideriamo cosa egli disse a proposito della nomenclatura:

“Nella nomenclatura dell'elettricità comunemente adottata in questo paese, positivo o più è sinonimo di elettricità vitrea, negativo o meno di elettricità resinosa. Le parole “positivo” e “negativo”, “più” e “meno” sono sanzionate dall'autorità di Franklin, il quale ha reso ragione dei fenomeni supponendo l'esistenza di un solo fluido, il quale sarebbe in eccesso nei corpi che posseggono l'elettricità vitrea e in difetto in quelli che posseggono l'elettricità resinosa.

È un male per la diffusione della scienza che siano presenti nell'uso comune termini che implicano idee ipotetiche; ma allo stato attuale delle indagini è meglio adottare anche un linguaggio imperfetto che non formarne uno nuovo. Il lettore dovrà avere la bontà di considerare le denominazioni che io userò come designanti semplicemente le cause ignote di una certa serie di fatti.”¹⁸

Quindi, sebbene anche il termine “energia” avesse già un significato preesistente, come abbiamo visto attraverso Aristotele, esso fu adottato, nel campo scientifico, inizialmente come termine vago, come vaghe erano anche le idee degli scienziati dell'epoca a riguardo di questa quantità che si conservava, e che, man mano, andò chiarendosi fino ad assumere un significato definito e chiaro, tanto nel lessico quanto nella testa di ogni scienziato.

Questa consolidazione, nella mente di importanti scienziati, del concetto di energia, e della sua conservazione, iniziò a prendere forma negli anni '40 dell'Ottocento; ed è proprio in questi anni, più precisamente nell'anno 1847, che troviamo il celebre saggio di Helmholtz *Über die Erhaltung der Kraft* (*Sulla conservazione della forza*).

iv. Maggiori Contributori

Helmholtz, però, con il suo saggio del 1847, non fu l'unico scienziato a dare forma, a contribuire o a formulare un concetto di conservazione dell'energia. Molti scienziati, in quegli anni, approdarono a formulare, o almeno tentare di esprimere con il linguaggio dell'epoca, il principio, o per lo meno, l'idea della conservazione dell'energia. Esaminiamo qui di seguito alcuni esempi.

¹⁸ Cfr. ivi, vol. V. Citazione ripresa dal libro di Elkana (vedasi bibliografia).

Partiamo dal famoso inglese James Prescott Joule nato a Salford nell'anno 1818, riportando ciò che sostenne nella conferenza *On Matter, Living Force and Heat* a Manchester, il 18 Aprile 1847, nella sala di lettura della Chiesa di Saint Ann:

“Da questi fatti è chiaro che la forza spesa nel mettere in moto un corpo è trasportata dal corpo stesso ed esiste con esso e in esso, per l'intero corso del suo moto. Questa forza posseduta da corpi in movimento viene chiamata dai filosofi meccanici *vis viva* o *forza viva*. L'espressione può sembrare poco opportuna, dal momento che, propriamente parlando, non c'è vita; ma è utile al fine di distinguere la forza motrice da quella che ha carattere stazionario, la forza di gravità. Quando, perciò, nelle parti seguenti di questa conferenza, userò l'espressione *forza viva*, intenderete che voglio riferirmi semplicemente alla forza di corpi in movimento. La forza viva dei corpi è regolata dal loro peso e dalla velocità del loro moto. Possiamo ragionare, *a priori*, che una tale distruzione assoluta della forza viva non può aver luogo perché è manifestamente assurdo supporre che i poteri dati da Dio alla materia possano essere distrutti più che non possano essere creati da parte dell'uomo; ma non ci rimane questo solo argomento, per quanto decisivo possa apparire a ogni spirito non affetto da pregiudizi. La comune esperienza di ciascuno ci insegna che la forza viva non viene *distrutta* dall'attrito o dagli urti fra corpi. Abbiamo ragione di credere che le manifestazioni della forza viva sul nostro globo siano, oggi, altrettanto estese di quelle esistite in ogni tempo dal giorno della sua creazione o, almeno, dal giorno del diluvio: che i venti soffino con ugual forza, e che i torrenti scorrano con altrettanto impeto oggi quanto nel periodo remoto di 4000 o anche 6000 anni or sono; eppure sappiamo con certezza che, per tutto questo enorme intervallo di tempo, i moti dell'aria e dell'acqua sono stati incessantemente impediti e ostacolati da fenomeni d'attrito. Possiamo quindi concludere, con certezza, che questi moti dell'aria e dell'acqua, che costituiscono la forza viva, non sono *annientati* dall'attrito. In realtà li perdiamo di vista per qualche tempo; ma poi li vediamo riprodursi. Se così non fosse, è del tutto ovvio che da moltissimo tempo l'intera natura si sarebbe ridotta a una morta immobilità. Qual è dunque, possiamo chiederci, la causa di quest'apparente anomalia? Com'è dunque possibile che, benché in quasi tutti i fenomeni naturali assistiamo all'arresto del moto e all'apparente distruzione della forza viva, troviamo che in realtà non ha avuto luogo alcuna distruzione o perdita di forza viva? L'esperimento ci ha consentito di rispondere a queste domande in un modo soddisfacente; esso ci ha dimostrato infatti che, ogni volta che la forza viva viene apparentemente distrutta, si produce un equivalente che nel corso del tempo può essere riconvertito in forza viva. Questo equivalente è il *calore*.

La regola generale è quindi che, ogni volta che la forza viva è *apparentemente* distrutta, per percussione, per attrito o con altri mezzi analoghi, viene restituito un equivalente

esatto sotto forma di calore. È vero anche l'inverso di questa proposizione, ossia che il calore non può essere attenuato o assorbito senza la produzione di forza viva o della sua equivalente attrazione attraverso lo spazio. Vedete, perciò, che la forza viva può essere convertita in calore e che il calore può essere convertito in forza viva o nella sua equivalente attrazione attraverso lo spazio. Tutt'e tre, perciò – ossia il calore, la forza viva e l'attrazione attraverso lo spazio (a cui aggiungerei anche la *luce*, se rientrasse nell'ambito di questa conferenza) – sono reciprocamente convertibili l'uno nell'altro.”¹⁹

Da questa bellissima esposizione di Joule, si vede chiaramente che ha in mente un'idea di conservazione, ovvero che nulla si crea e nulla si distrugge²⁰, e che la forza viva, anche quando sembra venir distrutta dall'attrito, semplicemente si trasforma in un suo equivalente come, ad esempio, il calore e viceversa. Quindi cosa poteva mancare a Joule per arrivare ad una formulazione completa? Se però ricordiamo la citazione di Richard Feynman, come è stata riportata nelle prime pagine di questa tesi, la quale afferma che il principio di conservazione dell'energia è “un principio matematico”, allora, ci rendiamo conto che, in effetti, ciò che manca a Joule è una trattazione matematica del concetto che, però, è da lui ben espresso.

Joule comunque esegue numerosi esperimenti arrivando a provare non solo che il calore è moto, ma riesce anche a determinare l'equivalente tra lavoro meccanico e calore ottenendo risultati vicini al valore attualmente riconosciuto, pari a 4,186 J/cal. Questi risultati furono presentati da Joule al convegno della British Association for the Advancement of Science tenutasi a Cork nell'Agosto del 1843.

Un altro personaggio illustre, per quanto riguarda questo argomento, è il carpentiere Ludvig August Colding nato in Danimarca nell'anno 1815. Nel suo articolo *On the History of the Principle of the Conservation of Energy*, leggiamo:

“Poiché le forze della natura sono qualche cosa di spirituale e di immateriale, entità che ci sono note solo in virtù del dominio che hanno sulla natura, queste entità devono ovviamente essere molto superiori a tutto ciò che di materiale è nel mondo; ed essendo chiaro che solo attraverso di esse si esprime la sapienza che noi percepiamo e ammiriamo in natura, queste potenze devono evidentemente essere in relazione con la potenza spirituale, immateriale e intellettuale stessa che guida la natura nel suo progresso; ma se così è, è conseguentemente del tutto impossibile concepire queste

¹⁹ E.C. Watson, *Joule: Only General Exposition of the Principle of Conservation of Energy*, Amer. J. Phys., 15 (1947). Citazione ripresa dal libro di Elkana (vedasi bibliografia).

²⁰ Per parafrasare una celebre citazione di Antoine Laurent de Lavoisier.

forze come qualcosa di naturalmente mortale o perituro. È certo perciò che le forze devono essere considerate come assolutamente indistruttibili.”²¹

Notiamo anche qui, come nel testo di Joule, una convinzione nel e dimostrazione del principio di conservazione su basi religiose, anche se poi, a differenza di Colding, Joule supporta la sua tesi anche con un esempio pratico, collegato all’esperienza e al suo lavoro sperimentale. In seguito Colding presentò una tesi all’Accademia Reale Danese la quale affermò:

“L’idea principale di queste tesi del candidato politecnico Colding su cui è stata richiesta l’opinione dell’Accademia è che le forze che vanno perdute ai fini dell’azione meccanica in conseguenza di attrito, resistenza, pressione ecc., creano nei corpi azioni interne, per esempio calore, elettricità e simili, e che sono proporzionali alle forze perdute. Per corroborare questa asserzione egli ha eseguito una serie di esperimenti sul calore generato per attrito.

Riteniamo sia che la sua idea principale meriti pienamente di essere sottoposta a una verifica sperimentale sia che i suoi esperimenti siano così soddisfacenti come si potrebbe richiedere tenendo conto delle scarse attrezzature disponibili. Sugeriamo perciò di incoraggiarlo a continuare questi esperimenti concedendogli l’equipaggiamento richiesto, che si stima non superare la spesa di 200 *Rigsdaler*.”²²

Anche se c’è chi dice²³ che Colding avesse in mente un tale principio già nel 1840, ciò nondimeno la sua tesi venne stampata solo nel 1856, nove anni dopo il saggio di Helmholtz.

Arriviamo ora al medico tedesco Julius Robert von Mayer nato nel 1814 che, essendo medico come Helmholtz, viveva nell’ambiente della fisiologia e, quindi, aveva probabilmente ricevuto in quel campo uno stimolo analogo ad Helmholtz. Gli studi di fisiologia, secondo Elkana²⁴ - come vedremo più avanti - contengono uno dei quattro fattori ed elementi costituenti un buon fondamento per l’enunciazione del principio di conservazione dell’energia.

Di Mayer prenderemo in esame una parte della prima edizione del saggio del 1842 dal titolo *Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur*, dove scrive:

²¹ L. Colding, *On the History of the Principle of the Conservation of Energy*, “Lond. Phil. J.” (1864). Citazione ripresa dal libro di Elkana (vedasi bibliografia).

²² Ibid.

²³ Yehuda Elkana, *La scoperta della conservazione dell’energia*, Milano: Feltrinelli, 1977, p. 158.

²⁴ Yehuda Elkana, *La scoperta della conservazione dell’energia*, Milano: Feltrinelli, 1977, p. 30.

“Il fine delle righe seguenti è quello di tentare di rispondere alla domanda di che cosa dobbiamo intendere col vocabolo “forze” (*Kräfte*) e in che modo esse si comportino fra loro. Mentre designando un oggetto come materiale gli si attribuiscono già determinate proprietà, come il peso e l’estensione spaziale, alla denominazione di forza (*Kräfte*) si associa di preferenza il concetto dell’ignoto, del non indagabile, dell’ipotetico. Un tentativo di comprendere il concetto di forza con la stessa precisione con cui comprendiamo quello di materia, e di designare con esso solo oggetti realmente investigabili, non dovrebbe essere mal visto, con le conseguenze che ne derivano, a coloro che amano una visione della natura scevra da ipotesi. Le forze sono cause; di conseguenza trova piena applicazione in esse il principio: *causa aequat effectum* [la causa è uguale all’effetto]. Se la causa c ha l’effetto e , allora $c = e$; se e è a sua volta la causa di un altro effetto f , abbiamo che $e = f$ e così via: $c = e = f = \dots = c$. In una catena di cause e di effetti, nessun membro o nessuna parte di membro può diventare nullo, come appare chiaro dalla natura di un’equazione. Designiamo come indistruttibilità questa prima proprietà di tutte le cause.”²⁵

È interessante la descrizione che ne dà Mayer e di come egli stesso riconosca che, nella sua epoca, il termine forza (*Kräfte*) abbia un significato vago e non ben definito, a cui Mayer però desidera dare una definizione chiara attraverso cui possa poi prendere forma, attraverso il principio di causa-effetto, il principio di conservazione. L’unica sua limitazione, probabilmente, era un’ancora limitata conoscenza fisica e matematica, infatti, nel 1845 ci fu una seconda edizione di questo saggio dove, anche grazie all’aiuto di alcuni fisici, corresse gli errori presenti nella sua prima edizione del 1842.

È proprio questa ricerca di chiarificazione e di solidificazione del concetto di forza (*Kräfte*) o energia (per usare termini moderni) - come Mayer tentò di fare nel suo saggio - che ci permetterà di giungere al nostro concetto moderno del principio di conservazione dell’energia. Questa solidificazione di un concetto fluido e vago del termine può avvenire, ad esempio, attraverso una trattazione matematica del problema, e qui rientra in gioco la figura di Helmholtz.

²⁵ J.R. Mayer, *Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur*, “Ann. Der Chem. Pharm.” (1842). Citazione ripresa dal libro di Elkana (vedasi bibliografia).

V. Hermann von Helmholtz

Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz nato in Germania nel 1821, era un medico e, come già detto in precedenza, aveva letto in giovane età testi filosofici, fisici e matematici ottenendo così una buona base e cultura fisica e matematica. Essendo medico, poté lavorare nel celebre laboratorio di Johannes Müller a partire dal 1839 con personaggi come Émile Du Bois-Reymond, Brücke, Virchow e Ludwig. In quegli anni c'era un gran fermento e dibattito sulla questione del problema delle fonti del calore animale, e su questo tema Müller e il suo gruppo si adoperarono per trovare una soluzione. Fu su questo genere di problemi quindi che lo stesso Helmholtz si trovò ad operare. Molti dei suoi testi erano focalizzati su problemi di fisiologia; ciò nondimeno, è degno di nota l'articolo del 1845 *Wärme, physiologisch* (Calore, in fisiologia) per l'*Enzyklopädisches Handwörterbuch der medizinischen Wissenschaften*, in cui presenta le due teorie, quella del calorico e quella meccanica del calore, ritenendo l'ultima, sebbene incompleta, la teoria corretta. Inoltre, anche in questo testo, si nota il suo atteggiamento riduzionista (tipico anche di molti degli scienziati del laboratorio di Müller) volendo, nel suo intento, ricondurre la fisica alla meccanica, come pure i processi vitali alla fisica.

Arriviamo ora al più volte citato *Über die Erhaltung der Kraft* del 1847, il quale fu il suo primo saggio nel campo della fisica. Questo saggio è composto da un'introduzione e da sei sezioni nelle quali Helmholtz tratta i vari aspetti della sua tesi.

Nell'introduzione egli afferma:

“Poiché la trattazione seguente era destinata, nella parte precipua del suo contenuto, soprattutto a fisici, ho preferito porre le sue basi in modo indipendente da una fondazione filosofica: nella pura forma di una premessa fisica, della quale sviluppare poi le conseguenze, che saranno confrontate con le leggi empiriche dei fenomeni naturali, vigenti nei diversi rami della fisica.”²⁶

Finita l'introduzione iniziano le varie sezioni.

I sezione: il principio di conservazione della forza viva.

“Se cerchiamo di determinare l'espressione matematica di siffatto principio, la troviamo nella nota legge della conservazione della forza viva. La quantità di lavoro, che è ottenuta e spesa, può essere, come si sa, equiparata a un peso m sollevato a una

²⁶ V. Cappelletti, *Opere di HERMANN VON HELMHOLTZ*, UTET, Torino 1967, p. 49.

determinata altezza h ; essa è allora mgh , dove g indica l'intensità della gravità. Per poter salire liberamente in linea retta fino all'altezza h , il corpo m ha bisogno di una velocità $v = \sqrt{2gh}$, e la riacquista nella caduta.”²⁷

Arrivando quindi alla formula matematiche $\frac{1}{2}mv^2 = mgh$.

Helmholtz afferma poi: “In sistemi, dunque, che obbediscono alla legge della conservazione della forza viva nella sua piena generalità, le forze semplici dei punti materiali devono essere forze centrali.”²⁸

II sezione: il principio della conservazione della forza.

In questa sezione arriva alle seguenti conclusioni finali:

“1) ogni volta che corpi naturali, a causa di forze attrattive o repulsive, che siano indipendenti dal tempo e dalla velocità, agiscono l'uno sull'altro, la somma delle loro forze vive e di tensione dev'essere costante; la quantità massima di lavoro, che si può ottenere, dev'essere una quantità determinata, finita;

2) se, invece, nei corpi naturali si danno anche forze, che dipendono dal tempo e dalla velocità, o che agiscono in direzioni diverse dalla linea congiungente due dei punti materiali attivi, per esempio in una direzione rotatoria, allora sarebbero possibili composizioni di tali corpi, nelle quali o si perde forza all'infinito, o se ne acquista (d);

3) in uno stato di equilibrio di un sistema di forze sotto l'azione di forze centrali, le forze interne e le esterne devono tenersi per sé stesse in equilibrio, se noi immaginiamo che i corpi del sistema siano legati tra loro in modo da essere immobili, e che soltanto il sistema nella sua interezza possa muoversi verso corpi al di fuori di esso. Un sistema fisso di tali corpi, perciò, non potrà mai essere messo in movimento per effetto delle sue forze interne, ma solo attraverso l'intervento di forze esterne. Se, invece, si dessero forze diverse dalle centrali, vi sarebbero legami rigidi tra corpi naturali, che si muoverebbero da sé, senza aver bisogno di una relazione ad altri corpi.”²⁹

III sezione: l'applicazione del principio ai teoremi meccanici.

Qui Helmholtz menziona tutti i casi in cui è stato adoperato fino ad allora il principio di conservazione della forza viva:

²⁷ Cfr. ivi, p. 55.

²⁸ Cfr. ivi, p. 58.

²⁹ Cfr. ivi, p. 64.

“1) *Tutti i movimenti, che si svolgono sotto l’influenza della forza di gravitazione universale, e perciò quelli dei corpi celesti e dei corpi gravi sulla Terra.*”³⁰

“2) *La trasmissione dei movimenti attraverso i corpi incompressibili, solidi e fluidi, se non si verificano né attrito né urto di materie inelastiche.*”³¹

“3) *I movimenti di corpi solidi e fluidi, perfettamente elastici.*”³²

IV sezione: l’equivalente meccanico del calore.

Notiamo solo brevemente che in questa sezione Helmholtz menziona alcuni dei lavori sul calore svolti da Joule.

Di questa sezione riportiamo qui solo un breve paragrafo riguardante la questione del calore:

“Quel che è stato finora chiamato quantità di calore, potrebbe servire d’ora in poi come espressione in primo luogo della quantità di forza viva del movimento termico, e in secondo luogo della quantità di quelle forze elastiche degli atomi, che, cambiando la loro disposizione, possono provocare un tale movimento; la prima parte corrisponderebbe a ciò che fino ad ora è stato chiamato calore libero, la seconda a ciò che è stato chiamato calore latente.”³³

V sezione: l’equivalente meccanico dei processi elettrici.

VI sezione: l’equivalente meccanico del magnetismo e dell’elettromagnetismo.

Al termine di questa sezione Helmholtz menziona brevemente anche la questione dei processi naturali nell’ambito organico.

Riportiamo qui di seguito il paragrafo conclusivo della VI sezione:

“Io credo di aver dimostrato, con quanto è stato detto, che la legge, di cui ci siamo occupati, non contraddice ad alcuno dei fatti finora noti alle scienze della natura, ed è, invece, convalidata in modo sorprendente da un gran numero di tali fatti. Mi sono sforzato di presentare, con la maggiore possibile completezza, le conseguenze che derivano dal porre in relazione alla legge della conservazione dell’energia le altre leggi, finora note, dei fenomeni naturali: conseguenze che ancora devono aspettare conferma dall’esperimento. Lo scopo di questa ricerca, il quale può anche ottenermi venia della parte ipotetica della ricerca stessa, fu quello di esporre ai fisici, con la maggiore

³⁰ Cfr. *ivi*, p. 65.

³¹ Cfr. *ivi*, p. 65.

³² Cfr. *ivi*, p. 66.

³³ Cfr. *ivi*, p. 73.

possibile completezza, l'importanza teorica, pratica ed euristica della legge di conservazione dell'energia, la cui esauriente convalida deve, forse, essere considerata come uno dei principali compiti della fisica nel prossimo futuro.”³⁴

Dalle brevi citazioni qui proposte del saggio di Helmholtz, si può notare l'approccio più rigoroso e matematico, ed è proprio questo approccio che diede la possibilità di iniziare a consolidare un concetto vago di conservazione nel principio di conservazione dell'energia. Ovviamente lui usò la parola “Kraft”, invece di energia, però dobbiamo renderci conto che egli costituì il ponte che fece passare la scienza da un concetto vago e confuso di forza ed energia, ad uno ben più definito dal punto di vista matematico, cosicché, una volta effettuato questo passaggio, la scienza ha potuto accantonare il termine nebuloso di “Kraft” e sostituirlo con il termine, ora più chiaro ed appropriato, di energia.

Interessante è inoltre notare quanta verità e lungimiranza c'è nell'affermazione che Helmholtz fece, nel paragrafo citato sopra, riguardo all'importanza del principio di conservazione dell'energia, che è tuttora uno dei principi fondamentali e caposaldo della forma mentis di uno scienziato moderno e di come, nonostante le successive scoperte e l'avvento della relatività e della meccanica quantistica, questo principio sia sopravvissuto e ricopra tuttora un ruolo fondamentale nella scienza.

vi. Conclusioni

Ricapitolando, tra i nomi degli scienziati più celebri coinvolti o ritenuti gli scopritori del principio di conservazione dell'energia, attorno alla prima metà dell'Ottocento, compaiono:

- Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (31.08.1821 – 8.08.1894)
- James Prescott Joule (24.12.1818 – 11.10.1889)
- Ludvig August Colding (13.07.1815 – 21.03.1888)
- Julius Robert von Mayer (25.11.1814 – 20.03.1878)

Per tentare di individuare a chi attribuire la prima formulazione del concetto di conservazione di energia nella sua generalità e quindi chi ne sia lo scopritore, occorre esaminare attentamente quali siano gli elementi e fattori da ritenersi fondamentali ed essenziali nel giungere alla sua formulazione. A questo riguardo non vi è dubbio che

³⁴ Cfr. ivi, p. 109.

ci volesse una fiducia a priori dell'esistenza di un principio generale di conservazione di una grandezza fisica, cioè che la natura abbia una legge di conservazione a cui obbedisce. Inoltre, riferendoci anche alla citazione iniziale di Feynman, il concetto di conservazione dell'energia è un concetto astratto, un principio matematico. Pertanto, occorre qualcuno che possedesse anche una buona conoscenza non solo fisica ma anche matematica. Oltre a queste due caratteristiche appena enunciate, Yehuda Elkana - nel suo libro *La scoperta della conservazione dell'energia* - ne menziona altre due³⁵ che sono: una realizzazione che la formulazione vettoriale-newtoniana e scalare-analitica lagrangiana siano formulazioni correlate concettualmente oltre che matematicamente equivalenti; e, infine, una conoscenza del problema delle "forze vitali" nel campo della fisiologia congiunta con la credenza che esse possano essere ridotte a leggi della natura inanimata.

Ne consegue che, tenendo conto dei quattro parametri che Elkana menziona - ma anche solo i due che, a mio avviso, appaiono maggiormente essenziali (uno, la convinzione a priori che in natura esistano delle leggi o principi di conservazione generali e, due, una conoscenza e competenza matematica adeguata) - si possa allora affermare che, tra i vari scienziati presi in esame, Hermann von Helmholtz sia quello che prima di tutti abbia ottimizzato questi parametri, facendo di lui il miglior candidato al titolo di scopritore del principio di conservazione dell'Energia.

³⁵ Yehuda Elkana, *La scoperta della conservazione dell'energia*, Milano: Feltrinelli, 1977, p. 30.

vii. Bibliografia

Brown S.C. (ed.), *Collected Works of Count Rumford*, Harvard 1968.

Cappelletti V., *Opere di HERMANN VON HELMHOLTZ*, UTET, Torino 1967.

Colding L., *On the History of the Principle of the Conservation of Energy*, “Lond. Phil. J.” (1864).

Davy John, *The Collected Works of Sir Humphry Davy*, London, 1839-1840.

Dugas, R., *Histoire de la mécanique*, Éd. Du Griffon, Neuchâtel, 1950; trad. Ingl. *History of Mechanics*, Central Book Co., New York 1955.

Elkana Yehuda, *La scoperta della conservazione dell'energia*, Milano: Feltrinelli, 1977.

Feynman Richard P., Leighton Robert B., Sands Matthew, “*La fisica di Feynman*”, vol. 1, Zanichelli.

Lavoisier A. e Laplace P.-S., *Mémoire sur la chaleur* (1780), Gauthier-Villars, Paris 1920.

Mayer J.R., *Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur*, “Ann. Der Chem. Pharm.” (1842), ristampato in *Raum und Zeit*, a cura di E. Wildhagen, Deutsche Buchgemeinschaft, Berlin.

Planck M., *Das Prinzip der Erhaltung der Energie*, Berlin 1913.

Popper, Sir K., *The Nature of Philosophical Problems and their Roots in Science*, in *Conjectures and Refutations*, London 1963.

Watson E.C., *Joule: Only General Exposition of the Principle of Conservation of Energy*, “Amer. J. Phys.,” 15 (1947).

Young Thomas, *Lectures on Natural Philosophy*, London 1807.

https://www.fe.infn.it/~lenisa/2012_storia/principi_conservazione.pdf

<https://it.wikipedia.org/wiki/Energia>

<https://www.feynmanlectures.caltech.edu/>